

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРИВОДЕ НАСОСА

Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А.
Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия, emf2010@mail.ru

Аннотация — Статья посвящена анализу рабочих характеристик синхронного реактивного двигателя (СРД) с векторным управлением в приводе насосной установки при помощи математического аппарата электрической схемы замещения машины переменного тока. Производится расчет параметров схемы замещения для СРД определенной мощности. Показано, что применение векторного управления существенно повышает энергетические рабочие свойства СРД в целевом приложении во всем диапазоне регулирования скорости.

Ключевые слова — синхронный реактивный двигатель, регулируемый электропривод, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

В странах Европейского союза в настоящее время успешно применяется ряд мер, способствующих значительному снижению энергопотребления. Одной из таких мер является разработка стандартов энергоэффективности (например, стандарт МЭК IEC 60034-30, вводящий классы энергоэффективности асинхронных двигателей: IE1 (standard), IE2 (high), IE3 (premium), а также его российский аналог ГОСТ Р 54413-2011 [1]) и ввод в эксплуатацию промышленного оборудования, отвечающего этим стандартам.

Учитывая, что электродвигатели составляют значительную часть промышленного электропотребления, создание серийных двигателей, соответствующих высоким классом энергоэффективности (IE 3 и выше), становится высокоприоритетной задачей для промышленности всех европейских стран.

Асинхронные двигатели (АД) широко применяются в самых различных приложениях благодаря низкой стоимости, высокой надежности, относительно высоким рабочим свойствам. Важным их достоинством является также возможность непосредственного питания от промышленной сети, без необходимости обязательного применения преобразователя частоты (ПЧ). Тем не менее, к настоящему времени конструкция АД достигала предела своего технологического совершенствования: оптимизированы обмоточные данные, изоляционные материалы, источники питания [7]. При этом оставаясь приемлемыми по стоимости, АД в номинальном режиме могут соответствовать лишь классу эффективности IE2.

Дальнейшее увеличение КПД АД для достижения класса IE3 требует использования таких мер как увеличение сечения провода обмотки статора, применение медной клетки ротора, применение стали магнитопровода с низкими потерями, удлинение машины, усложнение технологии производства. Все это

ведет к чрезмерному удорожанию, особенно для машин с высотами оси вращения до 180 мм [6].

Кроме того, при регулировании скорости вниз от номинала энергетические свойства АД, как правило, значительно снижаются, ввиду сложности организации оптимального регулирования [8,9], что является существенным недостатком большинства асинхронных приводов, поскольку приводы, требующие регулирования скорости, обычно большую часть времени работают с нагрузкой существенно ниже номинальной [9].

Создание экономически рентабельного электропривода более высокого класса энергоэффективности IE возможно при замене АД синхронным реактивным двигателем (СРД) улучшенной конструкции, который, не имеет электрических потерь в обмотке ротора, и может соответствовать самым высоким классам энергоэффективности (IE3 и IE4) [7]. От традиционной конструкции СРД с явно выраженными полюсами СРД улучшенной конструкции отличается, в первую очередь, применением конструкции ротора с повышенной магнитной анизотропией, наиболее часто применяемым вариантом которой является ротор с немагнитными промежутками (“flux-barrier rotor”). Такой ротор с немагнитными промежутками может быть изготовлен как с помощью аксиальной шихтовки пластин (“Axially Laminated Anisotropic rotor”, плоскость пластины располагаются вдоль оси вала, рис. 1а), так и с применением традиционной, трансверсальной шихтовки (“Transversally Laminated Anisotropic rotor”, плоскость пластины располагается поперечно оси вала, рис. 1б) [10].

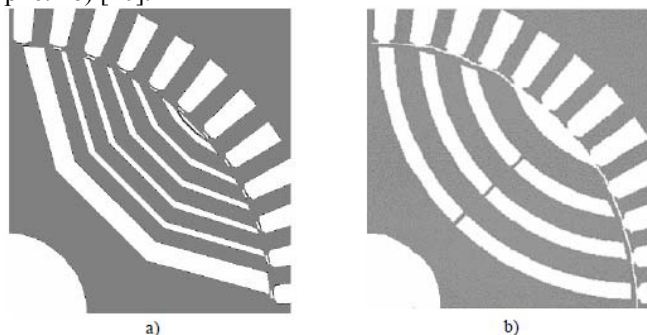


Рис. 2 - Конструкции ротора СРД а) с аксиальной шихтовкой пластин, б) с трансверсальной шихтовкой пластин [10]

В настоящее время ведущие европейские производители энергоэффективных двигателей производят СРД в комплекте с ПЧ для использования в приложениях, где применение частотно-регулируемого

двигателя дает значительный эффект энергосбережения. Это, прежде всего, приложения, где двигатель работает в длительном режиме на насосную, вентиляторную или компрессорную нагрузку. Такие приложения составляют более 70 % от всех приложений, где используется регулируемый ЭП [11].

Так, например, международным концерном АВВ производятся две серии СРД для привода насосов и вентиляторов: двигатели класса IE4, а также малогабаритные двигатели класса IE3 [12]. Также энергоэффективные СРД (IE3) совместно с ПЧ применяют, в составе своих насосных установок, немецкая фирма «Klein, Schanzlin & Becker» (KSB) [13].

Для количественной оценки экономического эффекта применения СРД в такого рода установках необходимо проведение расчета рабочих характеристик СРД привода, с учетом основных особенностей насосного приложения: требуемого диапазона регулирования по скорости, характера изменения нагрузки и системы регулирования двигателя.

В данной работе проводятся такие расчеты для СРД двигателя, работающего с двумя различными системами регулирования, с помощью математического аппарата схемы замещения двигателя переменного тока.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ СРД

Для получения уравнений схемы замещения СРД необходимо рассмотреть векторную диаграмму фазы статора синхронной реактивной машины [2, 4].

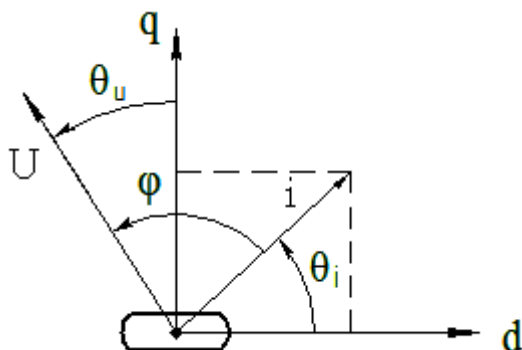


Рис. 3. Векторная диаграмма СРД

В дальнейших расчетах распределение обмотки статора принято синусоидальным, магнитная проводимость сердечника – постоянной. Также были приняты допущения об отсутствии магнитных потерь и постоянстве величины индуктивности рассеяния обмотки статора (независимости от положения ротора). Для учета того, что при питании от преобразователя частоты амплитуда и частота напряжения могут изменяться, введем следующие обозначения: U_n – номинальное фазное напряжение, f_n – номинальная частота питания, U – фазное напряжение в расчетном режиме работы, f – частота в расчетном режиме работы, $\omega = 2\pi \cdot f$, $\omega_n = 2\pi \cdot f_n$, $\gamma = U/U_n$, $\alpha = f/f_n$.

Из векторной диаграммы можно определить выражение для комплекса тока фазы статора через приложенное напряжение, параметры машины и угол

между вектором тока и осью d ротора (угол θ_i , см. рис. 2) [2]:

$$\dot{I} = \dot{I}_0 + \dot{I}_\theta = -j \cdot \frac{\dot{U}'}{x_d} + \frac{\dot{U}'}{r_\theta - j \cdot x_\theta}, \quad (1)$$

где I_0 – ток намагничивания; I_θ –нагрузочный ток; $\dot{U}' = \gamma \cdot U_{ном} - \dot{I} \cdot r$; r – активное сопротивление фазы статора; $x_\theta = \omega \cdot L_\theta$; $L_\theta = L_d \cdot L_q / (L_d - L_q)$;

$$r_\theta = \frac{\alpha \cdot x_{d ном}}{(1 - x_{q ном} / x_{d ном}) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i)}; \quad x_d = \omega \cdot L_d, \quad x_q = \omega \cdot L_q$$

– индуктивные сопротивления статора по осям d и q, соответственно, в рабочем режиме; $x_{d ном} = \omega_n \cdot L_d$, $x_{q ном} = \omega_n \cdot L_q$ – индуктивные сопротивления статора по осям d и q, соответственно, при номинальной частоте питания.

Выражение (1) соответствует электрической схеме рис. 3. В этой схеме присутствуют реальные сопротивления машины: r – в первичной ветви, и x_d – в ветви намагничивания. Вторичную ветвь составляют фиктивные сопротивления r_θ и x_θ . Величина r_θ зависит от значения угла θ_i , характеризующего режим работы двигателя. Мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении вторичной ветви равна электромагнитной мощности, которая в реальном двигателе, идет на создание момента:

$$P_{эм} = m \cdot r_\theta \cdot I_\theta^2 = M_{эм} \cdot \omega, \quad (2)$$

где $m = 3$ – число фаз двигателя, $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя.

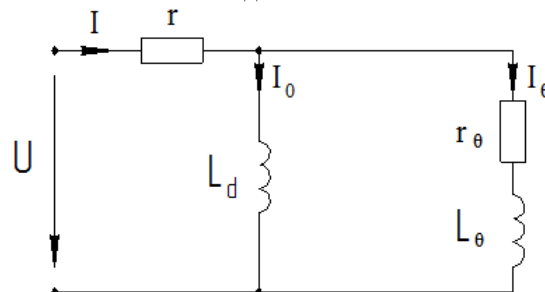


Рис. 4. Схема замещения СРД при переменной частоте питания на одну фазу

Параметрами режимы работы, которые должны быть заданы для расчета схемы замещения являются модуль U и частота f приложенного напряжения, а также величина угла θ_i .

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СРД

Одним из безусловных преимуществ использования СРД в сравнении с другими типами энергоэффективных двигателей является отсутствие в его конструкции постоянных магнитов и максимальная унификация производства СРД с производством АД (в случае ТЛА-ротора): статоры машин имеют одинаковую конструкцию, магнитопроводы роторов также собираются из штампованных пластин с использованием той же технологии [2,7].

Поэтому для сокращения сроков проектирования СРД и минимальной переделки технологии производства

(а значит и минимальной цене производства СРД) наиболее рационально проектирование СРД на базе уже производящихся статоров АД. Одним из возможных путей при проектировании может быть случай, когда статор двигателя остается без изменений (или подвергается минимальным изменениям: например, изменяется только сечение и число витков обмоточного провода), а ротор СРД рассчитывается так, чтобы рабочие характеристики двигателя соответствовали техническому заданию [10].

Основываясь на таком подходе, при расчете параметров СРД, соответствующего рассматриваемому АД, примем, что трехфазный магнитопровод статора двигателя остается тем же самым, а вместо короткозамкнутого ротора АД, применяется явнополюсный ротор СРД.

Для определения параметров СРД этим способом сначала необходимо определить параметры схемы замещения серийного АД.

Для расчета параметров схемы замещения АД используем каталожные данные асинхронного двигателя класса IE2 фирмы ABB (таблица 1) [14].

Таблица 1

Паспортные данные асинхронного двигателя

Параметр	Значение
Обозначение	M3BP 80 MA
Номинальная мощность P_n , кВт	0,55
Номинальная частота f , Гц	50
Число пар полюсов Z_p	2
Номинальная скорость n_n , об/мин	1415
Номинальный КПД η	74,5
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,73
Номинальный фазный ток I_n , А	1,45
Кратность пускового тока	5
Кратность пускового момента	2
Кратность максимального момента	2,8

Используя паспортные данные (таблица 1) рассчитаем параметры схемы замещения АД по методике, основанной на теории Г-образной схемы замещения АД [5]. Рассчитанные параметры АД приведены в таблице 2.

Таблица 2

Рассчитанные параметры схемы замещения АД

Параметр	Значение
R_s , Ом	18,306
R_r' , Ом	5,5
L_m , Гн	0,675
L_{sc} , Гн	0,03
L_{rc}' , Гн	0,03

Рассчитаем теперь, основываясь на параметрах из таблицы 2, параметры схемы замещения СРД.

При принятых выше допущениях следующие параметры СРД $f_{ном}$, Z_p , R_s , L_{sc} останутся без изменений в сравнении с АД. Далее, необходимо определить значения полных индуктивностей статора, которые входят в схему замещения СРД. В предположении, что значение индуктивности рассеяния статора не зависит от положения ротора, полные индуктивности равны:

$$L_d = L_{ad} + L_{sc}; L_q = L_{aq} + L_{sc}, \quad (3)$$

где L_d – полная индуктивность обмотки статора по оси d, L_{ad} – взаимная индуктивность обмотки статора и ротора

обмотки статора по оси d, где L_q – полная индуктивность обмотки статора по оси q, L_{aq} – взаимная индуктивность обмотки статора и ротора обмотки статора по оси q.

При применении ротора ТЛА-типа, согласно имеющимся экспериментальным исследованиям параметров СРД [10], индуктивность по оси наибольшей магнитной проводимости ротора L_{ad} тоже изменится мало, по сравнению с индуктивностью L_m асинхронного двигателя, при условии сохранения величины воздушного зазора. Однако при проектировании СРД обычно выбирают несколько меньшую величину индуктивности L_{ad} [10]. Основываясь на этих сведениях, примем в дальнейших расчетах $L_d = L_s = L_m + L_{sc}$.

Отношение индуктивностей $\zeta = L_d/L_q$ зависит от типа применяемой конструкции ротора. Экспериментально подтвержденные значения этого отношения для ТЛА конструкции ротора, которая является наиболее технологичной и хорошо подходит для использования при крупносерийном производстве двигателей, составляют $\zeta = 6-8$ (для АЛА-роторов $\zeta = 9-12$) [10]. Примем $\zeta = 8$. Полученные при принятых выше допущениях параметры схемы замещения СРД указаны в таблице 3.

Таблица 3

Рассчитанные параметры схемы замещения СРД

Параметр	Значение
R_s , Ом	18,306
L_d , Гн	0,705
L_q , Гн	0,088

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СЛУЧАЯ СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СРД

Работы по исследованию СРД привода, проведенные отечественными и зарубежными инженерами в 60-70 гг. XX века были посвящены в основном частотно-регулируемому СРД приводу со скалярным управлением [2]. Более поздние исследования, начиная с 90-х годов, уже имеют дело преимущественно с векторным управлением СРД [7, 10].

Одной из целей данной работы является сравнительный анализ рабочих свойств СРД привода со скалярным и векторным управлением в насосном приложении. Система привода со скалярным управлением имеет несомненные преимущества простоты и дешевизны реализации. При этом она обеспечивает точное регулирование скорости синхронного двигателя даже при отсутствии обратных связей по току и по скорости. В такой системе управления, однако, не осуществляется контроль угла θ двигателя: он принимает различные значения, в зависимости от величины механической нагрузки на валу. При этом смена нагрузочных режимов сопровождается динамическими колебательными процессами, которые могут привести к выпадению двигателя из синхронного режима работы, в случае превышения критического угла нагрузки θ_u . Этот фактор существенно ограничивает реальную перегрузочную способность СРД при скалярном управлении, и приводит

к тому, что рабочий режим двигателя выбирается не по критерию наилучших энергетических характеристик, а по критерию устойчивости режима работы и обеспечения достаточной перегрузочной способности [2].

Для данного расчета выберем закон регулирования напряжения $U/f = \text{const}$, наиболее часто применяющийся в таком приводе на практике. В рассматриваемом случае значение угла θ_i , необходимое для расчета сопротивления r_0 определяется исходя из соотношения (см. рис 2):

$$\theta_i = \theta_u + \frac{\pi}{2} - \varphi, \quad (4)$$

При этом значение угла нагрузки θ_u определяется из уравнения:

$$M_{эм}(\theta_u) - M_n = 0, \quad (5)$$

где $M_{эм}(\theta_u)$ – механическая характеристика двигателя, с учетом сопротивления r [4] (рис. 5), M_n – значение момента нагрузки. Угол φ определяется в соответствие с выражением активной мощности, которое можно получить из векторной диаграммы [4]:

$$mUI \cos \varphi = \frac{m \cdot U^2}{r^2 + x_d \cdot x_q} [r + 0,5(x_d - x_q) \sin(2\theta_u)] \quad (6)$$

При вычислении момента насосной нагрузки двигателя будем считать, что момент нагрузки M_n пропорционален квадрату скорости вращения и определяется по формуле [3] (рис. 4):

$$M_n = k_f \cdot \omega^2, \quad (7)$$

где $k_f = M_{ном}/(\omega_{ном}^2)$ – коэффициент трения, $M_{ном}$ – номинальный момент нагрузки АД, $\omega_{ном}$ – номинальная скорость вращения АД, ω – скорость вращения двигателя.

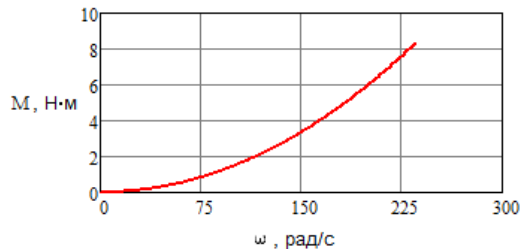


Рис. 5. Насосная нагрузочная характеристика

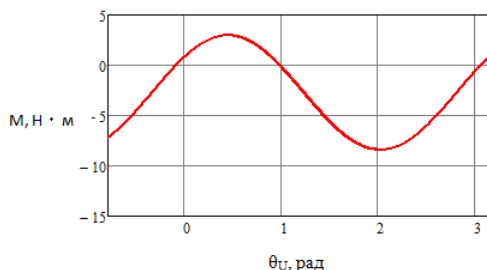


Рис. 6. Пример рассчитанной механической характеристики СРД

Графики рассчитанных рабочих характеристик СРД с параметрами из таблицы 3 при скалярном управлении показаны на рисунках 6-10 (темные линии).

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СЛУЧАЯ ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СРД

В векторной системе управления СРД задается определенное значение угла θ_i при использовании обратной связи по скорости вращения ротора, а также определенное значение модуля тока/напряжения. При этом заданное значение угла θ_i поддерживается как в установившихся, так и в динамических режимах работы, что исключает выпадение двигателя из синхронного режима.

В зависимости от целевого приложения для СРД могут применяться различные стратегии управления углом θ_i . В данной работе для векторной системы управления СРД примем стратегию на постоянство токового угла $\theta_i = 45^\circ$, при котором машина создает максимальный момент на единицу тока [10].

При этом величина модуля тока I_0 нагрузочной ветви схемы замещения определяется как:

$$I_0 = \sqrt{\frac{P_2}{3 \cdot r_0}}, \quad (8)$$

где $P_2 = M \cdot \omega$ – механическая мощность на валу двигателя, $r_0 = f(\theta_i)$ – активное сопротивление нагрузочной ветви схемы рис. 2 [2].

Величина модуля фазного напряжения СРД рассчитывается по формуле:

$$U = \left| \frac{r_s \cdot I_0}{jx_d} \cdot (r_0 + jx_0 + 1) + r_0 \cdot I_0 + jx_0 \cdot I_0 \right|, \quad (9)$$

где r_s, r_0, x_d, x_0 – параметры схемы, j – мнимая единица.

Расчет рабочих характеристик СРД для определенной скорости ω при использовании векторной системы управления ведется в следующей последовательности:

- определяется значение момента на валу для данной скорости по нагрузочной характеристике (рис. 4);
- Для СРД с $\theta_i = \pi/4$ определяется U_s при данной скорости и моменте нагрузки. Рассчитываются рабочие характеристики СРД по схеме замещения.

Графики рассчитанных рабочих характеристик СРД с параметрами из таблицы 3 с векторным управлением показаны на рисунках 6-10 (светлые линии).

Выводы

По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- С учетом принятых при расчете параметров двигателя допущений, КПД СРД мощностью 0,55 кВт в номинальном режиме достигает 84,11 % (рис. 8), что значительно выше КПД асинхронного двигателя класса энергоэффективности IE2 [1];
- Коэффициент мощности СРД в номинальном режиме (рис. 7) несколько ниже, чем у АД той же мощности (таблица 1), что означает увеличение величины реактивного тока в случае СРД; однако это не обязательно приведет к увеличению номинала преобразователя, поскольку у СРД, по сравнению с АД уменьшается величина активного тока;

- СРД привод со скалярной системой управления, является относительно простым и дешевым решением для обеспечения постоянной скорости вращения вала в различных нагрузочных режимах; однако он плохо подходит для использования в насосных установках;
- Недостатками СРД привода со скалярным управлением в насосном приложении являются: низкое использование двигателя из-за

необходимости обеспечения требований достаточной перегрузочной способности и устойчивого режима работы, крайняя сложность обеспечения оптимального энергетического режима работы двигателя во всем требуемом диапазоне регулирования скорости и сохранении простоты и надежности системы регулирования;

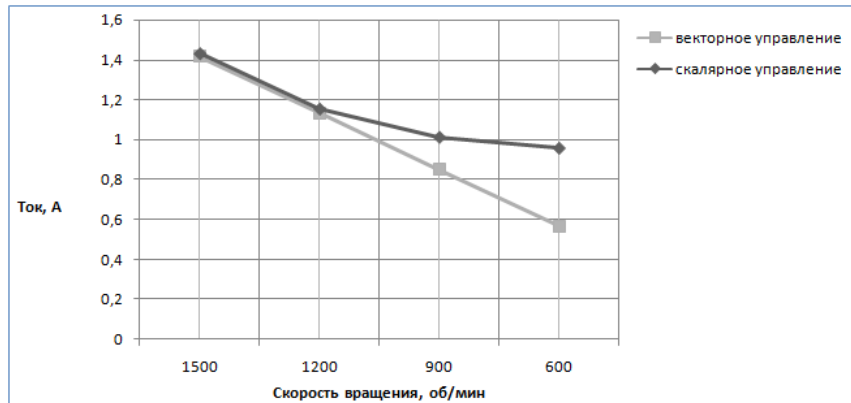


Рис. 7. Величина фазного тока двигателя в рассматриваемых режимах

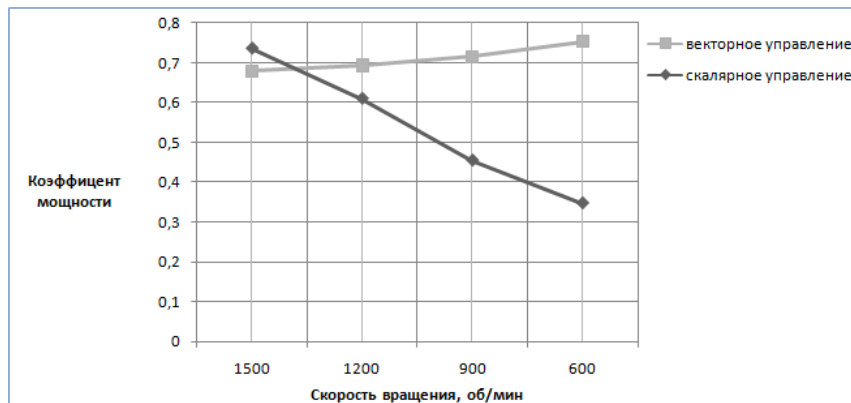


Рис. 8. Коэффициент мощности двигателя в рассматриваемых режимах

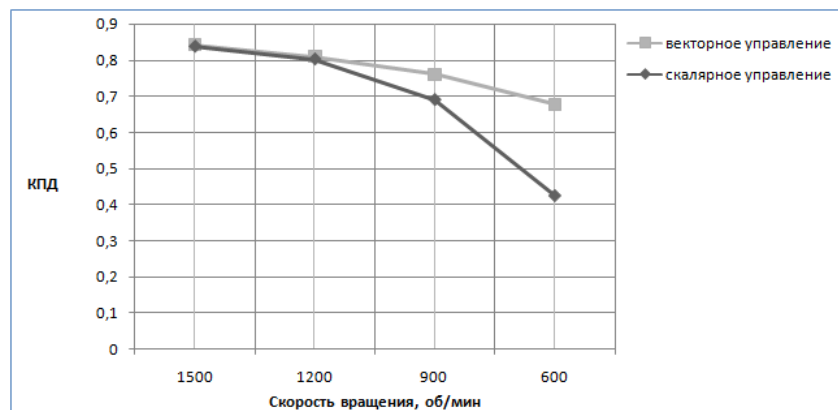


Рис. 9. Коэффициент полезного действия двигателя в рассматриваемых режимах

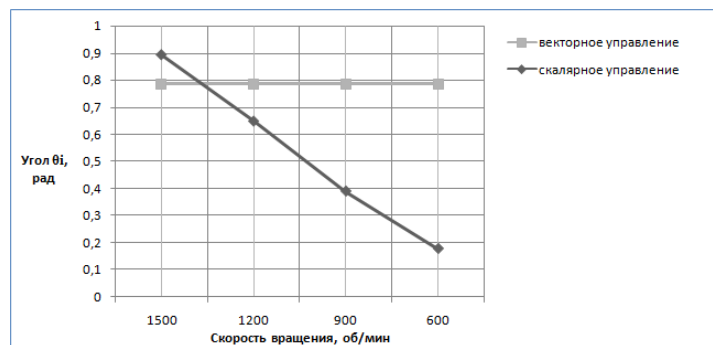


Рис. 10. Угол θ_i двигателя в рассматриваемых режимах

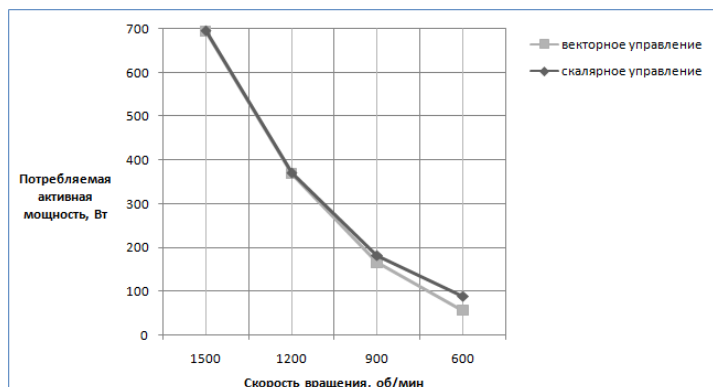


Рис. 11. Потребляемая двигателем активная мощность в рассматриваемых режимах

- Применение векторного управления для СРД привода позволяет избавиться от всех вышеописанных недостатков и использовать двигатель в оптимальном энергетическом режиме во всем диапазоне регулирования скорости, с учетом компенсации падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора и величины нагрузки в определенном рабочем режиме;
- Применение СРД с TLA конструкцией ротора в составе регулируемого привода насосов является оправданным решением, которое позволяет получить высокие значения энергетических свойств привода во всем диапазоне регулирования скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 54413-2011. Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE).
2. Берлин Е.М. Системы частотного управления синхронно-реактивными двигателями // Е.М. Берлин, Б.А. Егоров, В.Д. Кулик, И.С. Скосырев – Л.: Энергия, 1968.
3. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов // М.: Энергия, 1976 г.
4. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. "Электромеханика", 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988.
5. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
6. Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития

электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения), Кобелев А.С., Макаров Л.Н. Выбор внешнего диаметра сердечника статора для энергоэффективных асинхронных двигателей: сб. материалов. – Иваново, 2011. – 66-70 с.

7. Brown G. Developing synchronous reluctance motors for variable speed operation // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012), 6th IET International Conference on, 27-29 March 2012, pp 1-6.

8. C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, Pramod Agarwal Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - a Review // International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, April 2009, pp 61-70.

9. Maxwell, J. B. How to Avoid Overestimating Variable Speed Drive Savings // Proceedings of the Twenty-Seventh Industrial Energy Technology Conference, New Orleans, LA, May 10-13, 2005.

10. Haataja Jorma A comparative performance study of four-pole induction motors and synchronous reluctance motors in variable speed drives // Thesis for the degree of Doctor of Science (Technology), Lappeenranta University of Technology, June, 2003.

11. R. Saidur, S. Mekhilef, M.B. Ali, A. Safari, H.A. Mohammed Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings, in Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, no. 16, pp 543– 550.

12. Synchronous reluctance motor-drive package for industrial use. Optimized cost of ownership, ABB guide, 2013.

13. KSB SuPremE – the world's most efficient magnet-less pump motor, KSB guide, 2012.

14. Low voltage process performance motors, ABB catalogue, 2011.